



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ**

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**KONSTRUKCE APARATURY PRO ELOXOVÁNÍ SLITIN  
HLINÍKU**

DESIGN OF APPARATUS FOR ANODIZING ALUMINUM ALLOYS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Adam Prokop

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. David Košťál, Ph.D.

**BRNO 2021**



# Zadaní bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování  
Student: **Adam Prokop**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. David Košťál, Ph.D.**  
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Konstrukce aparatury pro eloxování slitin hliníku

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Anodická oxidická pasivace známá jako elox patří mezi jedny z nejčastějších povrchových úprav výrobků. Vytvořená vrstva je tvrdá a současně při použití barviva součásti propůjčuje zajímavý vzhled. Na Ústavu konstruování se slitiny hliníku používají pro výrobu některých drobných součástí pro laboratorní zařízení, nicméně součásti jsou běžně ponechány v původní podobě po obrábění.

Typ práce: vývojová – konstrukční

### Cíle bakalářské práce:

Vytvoření kompaktního zařízení, které by umožnilo řízenou pasivaci hliníkových dílců

Dílčí cíle bakalářské práce:

- přehled technologií pasivace slitin hliníku,
- popis technologického postupu procesu,
- konstrukční návrh zařízení do laboratorních podmínek.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, výkres sestavení.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://ustavkonstruovani.cz/texty/magisterske-studium-ukoncení/>

### Seznam doporučené literatury:

SHIGLEY, J.E., MISCHKE, Ch.R., BUDYNAS, R.G.: Konstruování strojních součástí. Překlad 7. vydání, VUTUM, Brno 2010, 1186 s, ISBN 978-80-214-2629-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Tato práce se zabývá problematikou eloxování hliníku a jeho slitin. Cílem práce bylo navrhnout kompaktní eloxovací zařízení do laboratorních podmínek pro součástky o maximálních rozměrech 200 x 100 x 100 mm. Všechny cíle práce se podařilo splnit, výstupem je konstrukční návrh, výkres sestavy a plně funkční zařízení.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Eloxování, hliník, konstrukce, povrchová úprava

## ABSTRACT

This thesis deals with the problem of anodizing aluminium and its alloys. The aim of the thesis was to design a compact anodizing apparatus for laboratory conditions for components with maximum dimensions of 200 x 100 x 100 mm. All goals of the thesis were met, the outputs of the thesis are design of the apparatus, assembly drawing and fully functional device.

## KEYWORDS

Anodizing, aluminium, construction, surface treatment



## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PROKOP, Adam. *Konstrukce aparatury pro eloxování slitin hliníku* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-05]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132249>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce David Košťál.





## PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Davidu Košťálovi, Ph.D. za cenné rady a vstřícnost při konzultacích i v této těžké covidí době. Speciálně bych chtěl tímto poděkovat Josefovi Pekařovi a firmě Donauchem s.r.o. za poskytnutí vzorku barviva Alumat black.

## PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Davida Košťála, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>14</b>
2.1	Základní princip anodické oxidace	14
2.2	Technologický postup anodické oxidace hliníku a jeho slitin	15
2.2.1	Předúprava povrchu hliníku a jeho slitin před anodickou oxidací	15
2.2.2	Anodická oxidace hliníku a jeho slitin	17
2.2.3	Barvení oxidické vrstvy	19
2.2.4	Utěsnění oxidických vrstev	20
2.2.5	Vliv legujících prvků hliníkových slitin na anodickou oxidaci	22
<b>3</b>	<b>ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE</b>	<b>23</b>
3.1	Analýza problému	23
3.2	Cíl práce	23
<b>4</b>	<b>KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ</b>	<b>24</b>
4.1	Technologický postup anodické oxidace v kompaktním zařízení	24
4.2	Návrh vany	25
4.2.1	Varianta A	26
4.2.2	Varianta B	27
4.2.3	Varianta C	28
4.3	Volba materiálu vany	29
<b>5</b>	<b>KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ</b>	<b>30</b>
5.1	Varianta B	30
5.1.1	Popis konstrukce	31
5.1.2	Jednotlivé díly	31
5.2	Výpočet zdroje	32
5.3	Výpočet plochy elektrod	33
5.4	Realizace	35
5.4.1	Cenová kalkulace	35
<b>6</b>	<b>DISKUZE</b>	<b>37</b>
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>38</b>

<b>8</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>39</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN</b>	<b>42</b>
9.1	Použité zkratky	42
9.2	Příklady použitých fyzikálních veličin	42
<b>10</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ</b>	<b>43</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM TABULEK</b>	<b>44</b>
<b>12</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b>	<b>45</b>

# 1 ÚVOD

Hliník je třetím nejvíce zastoupeným prvkem v zemské kůře, a i přesto je v technické praxi relativně novým kovem. Roku 1825 se podařilo dánskému chemikovi Hansu Christianovi Oerstedovi tento kov izolovat. Teprve v roce 1886 francouzský metalurg Hérault vymyslel způsob průmyslové výroby hliníku elektrolýzou, která výrazně srazila cenu a umožnila tak počátek rozmachu tohoto kovu napříč mnoha technickými odvětvími. V současné době je hliník a jeho slitiny nejpoužívanějším neželezným kovem v technické praxi. Mezi jeho nesporné výhody patří: nízká hustota, dobrá tvářitelnost, korozní odolnost, dobrá tepelná i elektrická vodivost. Mezi nevýhody patří: relativně nízká pevnost, nízká tvrdost a otěruvzdornost, nízká odolnost vůči kyselinám.

Jeden ze způsobů, jak zlepšit vlastnosti povrchů hliníku a jeho slitin je anodická oxidace neboli eloxování. Jedná se o proces, kdy se na povrchu součásti vytvoří tenká vrstva řádově 5 až 150  $\mu\text{m}$ , nejčastěji však 5 až 25  $\mu\text{m}$  oxidu hlinitého ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Tato povrchová úprava má hned několik pozitiv: zvýšení tvrdosti povrchu, zlepšení otěruvzdornosti, snížení drsnosti povrchu, korozní ochrana, možnost barevného provedení. Díky tomu je možné součásti ze slitin hliníku použít i tam, kde by to vlastnosti samotné slitiny nedovolovaly. Za to však eloxování snižuje pevnost v tahu a významně snižuje mez únavy eloxovaných součástí [1].

Eloxování hliníku je vcelku složitý a časově náročný proces mající spousty nejrozličnějších variant provedení. Nejčastěji se eloxování provádí na speciálních eloxovacích linkách, které zahrnují hned několik druhů lázní a technologických úkonů, aby výsledná kvalita eloxované vrstvy byla co možná nejlepší. Cílem této práce je navrhnout konstrukční řešení kompaktního eloxovacího zařízení pro laboratorní účely, které skloubí všechny potřebné kroky tohoto procesu při zachování dostatečné kvality eloxované vrstvy a zároveň nebude rozměrově a provozně náročné.



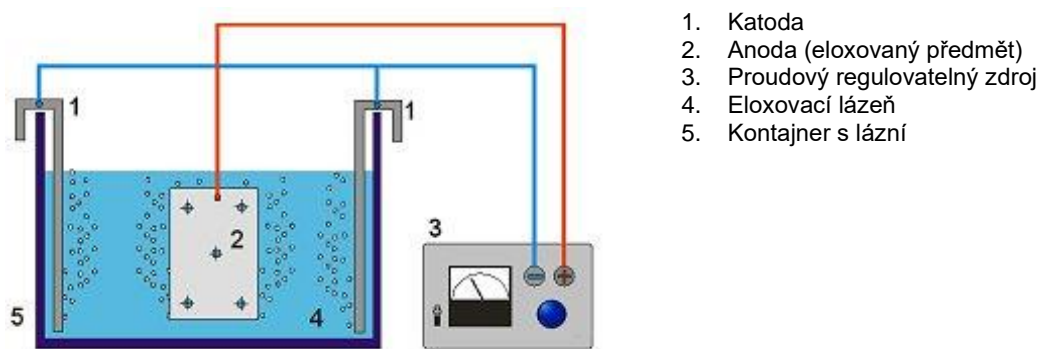
Obr. 1-1 Základní barevné varianty eloxu firmy Angelov [2]

## 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

### 2.1 Základní princip anodické oxidace

Anodická, nebo také elektrolytická, oxidace hliníku a jeho slitin je proces, při kterém je hliníkový dílec ponořen do vhodného média a připojen ke zdroji stejnosměrného či střídavého proudu. Hliníkový dílec je v případě stejnosměrného zdroje připojen na kladný pól – anodu a na záporný pól – katodu je připojena elektroda vyrobená z korozivzdorné oceli, hliníku, olova či titanu. Katoda musí být vyrobena z jednoho z těchto materiálů, jinak by docházelo ke kontaminaci lázně cizím kovem a kvalita eloxovaného povrchu by značně klesla [3].

Díky průchodu elektrického proudu se na anodě rozpouští hliník a roste počet hydroxidových aniontů  $\text{OH}^-$  v lázni. Chemickou reakcí  $\text{Al}^{3+}$  a  $\text{OH}^-$  vzniká na povrchu eloxované součásti tenká vrstva  $\text{Al}(\text{OH})_3$ . Vzniklá vrstva postupem času zabraňuje průchodu elektrického proudu – zvyšuje elektrický odpor a dochází tak k ohřevu součásti, díky tomu dochází k dehydrataci vrstvy  $\text{Al}(\text{OH})_3$  a přechází na oxid hlinitý  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [4]. Průchodem proudu eloxovací lázni dochází k jejímu lokálnímu ohřevu na rozhraní součást – lázeň, a proto je vhodné ji v průběhu anodizace míchat, aby nedocházelo k lokálním defektům.



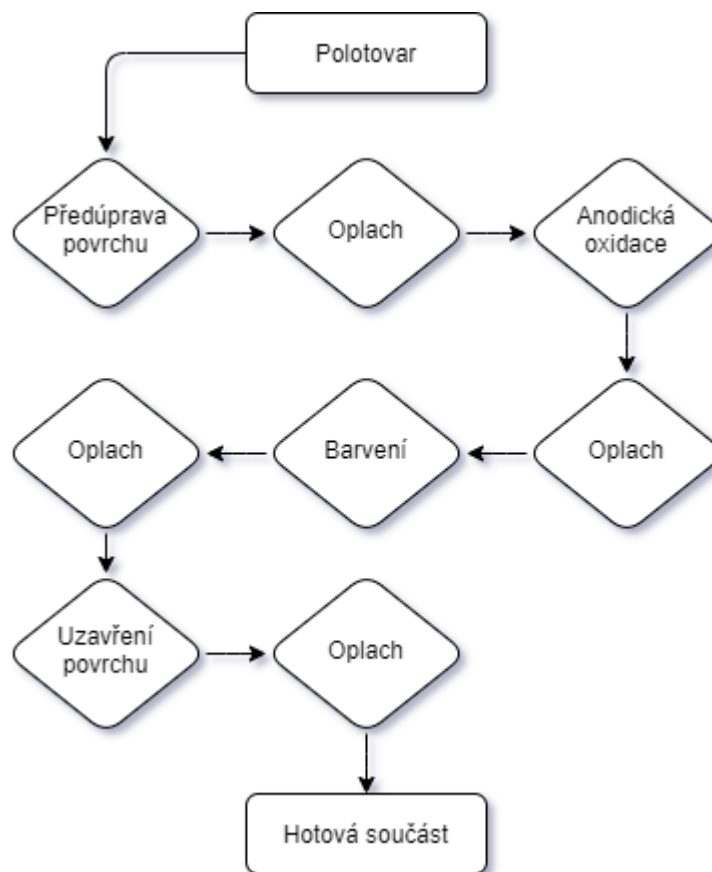
Obr. 2-1 Schéma zařízení pro anodickou oxidaci [5]

Výsledkem je tvrdá, elektricky nevodivá a ořezuvzdorná pórovitá keramická vrstva oxidu hlinitého. Právě díky její pórovitosti lze eloxované součásti barvit, jelikož částičky barviva se usazují v těchto pórech a následně je povrch uzavřen. Jestliže však chceme dosáhnout ještě tvrdšího a mechanicky odolnějšího povrchu, je vhodné pórovitost eliminovat tvrdou anodickou oxidací.

Při konstrukci dílů z hliníkových slitin, které se budou eloxovat, je třeba dbát u tolerancí funkčních ploch na to, že vzniklá oxidická vrstva vzroste cca o 1/3 své tloušťky nad původní kovový povrch. Z toho vyplývá, že oxidická vrstva silná 30  $\mu\text{m}$  vytvoří o 10  $\mu\text{m}$  silnější předmět z každé jeho eloxované strany [3].

## 2.2 Technologický postup anodické oxidace hliníku a jeho slitin

Anodická oxidace hliníku má podobně jako ostatní procesy povrchových úprav hned několik dílčích kroků navazujících na sebe a každý z nich ovlivňuje výsledné vlastnosti oxidické vrstvy součásti. Technologický postup anodické oxidace hliníku a jeho slitin se skládá ze tří základních kroků, které se pak dále dělí. Tyto kroky jsou: předúpravy, vlastní proces a dokončovací operace.



Obr. 2-2 Diagram technologického postupu anodické oxidace

### 2.2.1 Předúprava povrchu hliníku a jeho slitin před anodickou oxidací

První a nedílnou součástí technologického procesu anodické oxidace je předúprava povrchu eloxované součásti. Zde především záleží na požadavcích oxidické vrstvy na estetiku – čím lépe se povrch před anodickou oxidací připraví, tím lepší bude výsledný povrch nejen co se vizuálních aspektů týče. Druhy předúprav hliníkových materiálů definuje norma DIN 17611 a jednotlivé úpravy jsou značeny dle zkratk v Tab. 2-1.

Zkratka	Předúprava
E0	bez mechanické předúpravy
E1	broušeno
E2	kartáčováno
E3	leštěno
E4	broušeno a kartáčováno
E5	broušeno a leštěno
E6	chemicky (matně) mořeno

Tab. 2-1 Metody předúprav dle normy DIN 17611 [3]

Předúpravu povrchu před anodickou oxidací dělíme na dvě základní kategorie: mechanickou a chemickou. Od mechanických předúprav se v poslední době upouští a nahrazují je spíše chemické předúpravy z důvodu úspory nákladů a času. Po všech předúpravách povrchu je nutné součásti opláchnout nejlépe v demineralizované vodě.

### Odmaštění

Asi nejdůležitější součástí samotných předúprav je proces odmaštění. Struktura odmašťovaného povrchu se nijak nemění, avšak po předchozí výrobě polotovaru k anodické oxidaci pravděpodobně došlo ke kontaminaci povrchu součásti nejrůznějšími typy nečistot např. tuky, oleje, třísky atd. Tyto nečistoty je nutné před samotným procesem anodické oxidace odstranit, aby byla zajištěna odpovídající kvalita oxidické vrstvy. Čistící prostředky pro odmašťování jsou tvořeny tenzidy – povrchově aktivními látkami a organickými, či anorganickými solemi.

### Moření

Moření je chemický proces ovlivňující strukturu povrchu součásti určené k anodické oxidaci. Při moření dochází k naleptání a odstranění velmi tenké vrstvy součásti a tím dojde k vyhlazení a zlepšení kvality povrchu součásti. Pomocí moření lze odstranit přirozenou oxidační vrstvu a charakteristickou strukturu povrchu vytvořenou např. po čelním frézování. Povrch po moření je matně bílý až saténový [3]. Jako nejčastější mořidlo se používá roztok NaOH.



## 2.2.2 Anodická oxidace hliníku a jeho slitin

Pro anodickou oxidaci hliníku a jeho slitin známe hned několik různých variant technologií, díky kterým lze dosáhnout požadované tloušťky povrchové vrstvy. V průběhu času byla vynalezena spousta nejrůznějších elektrolytů a příměsí, které oxidační proces ulehčují, či zkvalitňují. V praxi se však užívá pouze hrstka osvědčených a technologicky zvládnutelných variant tohoto procesu. Některé ostatní druhy nacházejí své uplatnění pouze ve specializovaných oblastech, či se mohou použít při velmi specifických požadavcích zákazníka [3]. Po anodické oxidaci je nutné provést oplach nejlépe v demineralizované vodě.

Postup	Tloušťky vrstvy v $\mu\text{m}$	Barva oxidické vrstvy	Oblasti použití
Standardní postup GS+GSX	5-10	bezbarvá	stavebnictví, domácí spotřebiče, nábytek
Standardní postup GS+GSX - organicky barveno	5-10	barevná	stavebnictví, domácí spotřebiče, nábytek, bytová architektura
Standardní postup GS+GSX - elektrolyticky barveno v elektrolytu cínu (dvojstupňová metoda)	5-10	světle bronzová až černá	stavebnictví, domácí spotřebiče, nábytek, bytová architektura
Standardní postup + zvláštní stupeň, např. Spektro-Color-metoda elektrolyticky barveno v elektrolytu cínu (dvojstupňový postup)	5-10	světle bronzová až černá + zelené, modré, šedivé, žluté a červené odstíny	stavebnictví, domácí spotřebiče, nábytek, bytová architektura
Tvrdá anodizace	25-200	bezbarvá až šedá	strojírenství, automobilový a letecký průmysl
Pásová anodizace	0.2-25	bezbarvá	bytová architektura, elektroprůmysl

Tab. 2-2 Varianty postupu anodické oxidace [3]

### Metoda kyseliny sírové – stejnosměrný proud (GS metoda)

Metoda na bázi kyseliny sírové se v průběhu času velmi osvědčila a je dnes nejvíce rozšířenou metodou anodické oxidace [3]. Dnes se označuje jako standardní metoda. Anodická oxidace zde probíhá, jak již název vypovídá, v roztoku kyseliny sírové o hmotnostní koncentraci 180–200 g/l [6]. V porovnání s ostatními oxidačními metodami se metody GS (kyselina sírová) a GSX (kyselina sírová + kyselina šřavelová) osvědčily z těchto důvodů [3]:

- nízká spotřeba energie,
- nízké pracovní napětí,
- použití cenově dostupných chemikálií,
- vysoká provozní spolehlivost.

Oxidická vrstva vytvořená metodou GS či GSX vykazuje velkou odolnost proti opotřebení a je odolná vůči klimatickým vlivům. I proto je často využívána ve stavebnictví, architektuře a dalších odvětvích kde je kladen důraz na vzhled. Metoda GSX oproti metodě GS umožňuje vytvoření tvrdší a celistvější oxidické vrstvy.

Metoda	Zkratka	Druh proudu	Napětí (V)	Proudová hustota (A/dm <sup>2</sup> )	Teplota (°C)	Vlastní barva vrstvy
Kyselina sírová	GS	stejnoseměrný proud	13-20	1.2-2.0	18-21	žádná
Kyselina sírová – šťavelová	GSX	stejnoseměrný proud	20-25	1.2-2.0	20-25	žádná

Tab. 2-3 Pracovní parametry anodické oxidace – metoda GS a GSX [3]

### Metoda kyseliny chromové

Metoda anodické oxidace v elektrolytu kyseliny chromové se využívá převážně v letectví. Výsledná oxidická vrstva jeví velmi silné protikorozi vlastnosti a má výbornou přilnavost pro následné lakování. Obzvláště přínosné je, že tato metoda zabraňuje tzv. „Filigránské korozi“, což je typ koroze probíhající pod povlaky kovů [3]. V praxi nejpoužívanější metoda kyseliny chromové je metoda „Bengoug – Stuart“.

Označení	Elektrolyt	[g/l]	Proudová hustota [A/dm <sup>2</sup> ]	Napětí [V]	Teplota [°C]	Expoziční doba [min]	Tloušťka vrstvy	Barva
metoda „Bengoug - Stuart“	CrO <sub>3</sub>	20-30	0.1-0.2	do 50	40	10-20	3-8	šedá

Tab. 2-4 Pracovní parametry anodické oxidace – metoda „Bengoug – Stuart“ [3]

### Metoda smaltu

Anodická oxidace metodou smaltu probíhá v elektrolytu vzniklém smíšením šťavelanu draselno–titaničitého, kyseliny borité a kyseliny šťavelové. Vrstva vytvořená touto metodou jeví obzvláště dobré kluzné vlastnosti a velkou odolnost proti otěru [7]. Součásti eloxované pomocí této metody mají využití např. v textilním průmyslu pro vedení nití.

Označení	Elektrolyt	[g/l]	Proudová hustota [A/dm <sup>2</sup> ]	Napětí [V]	Teplota [°C]	Expoziční doba [min]	Tloušťka vrstvy	Barva
Metoda smaltu	šťavelan draselno-titaničitý, kyselina boritá a šťavelová		2-3	80-120	40-60	10-40	10-20	šedobílá

Tab. 2-5 Pracovní parametry anodické oxidace – metoda smaltu [3]

## Tvrdá anodizace

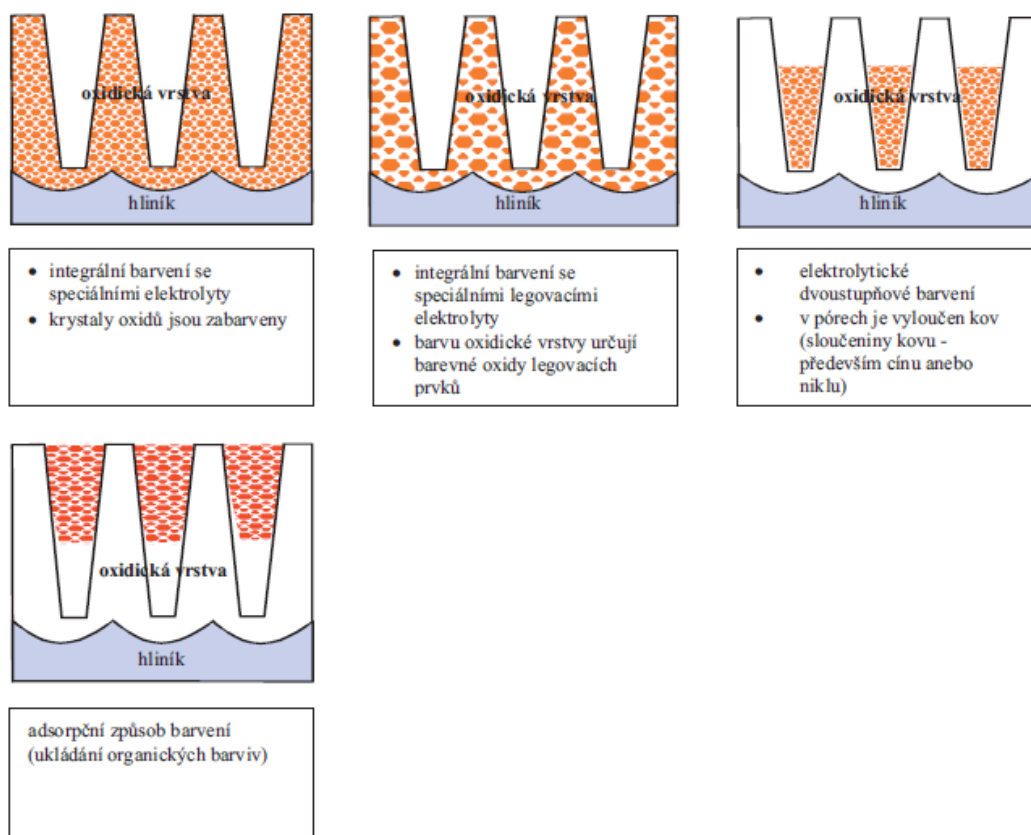
Tvrdá anodizace probíhá v základu stejně jako metoda kyseliny sírové, ale zásadní rozdíl je v provozní teplotě lázně. Ta bývá velmi nízká, někdy až  $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$  [7]. Tvrdou anodickou oxidací vznikají velmi silné a tvrdé oxidické vrstvy, které mají výborné elektrické izolační vlastnosti.

### 2.2.3 Barvení oxidické vrstvy

Vzniklé povrchové vrstvy po anodické oxidaci jsou značně pórovité, a tudíž je lze zabarvovat na různé odstíny známých barev. Zabarvení můžeme provést hned několika technologiemi a lze z nich vybírat na základě požadavků pro finální vzhled součásti. Rozlišujeme tyto základní metody barvení oxidických vrstev [3]:

- adsorpční barvení,
- integrální barvení,
- elektrolytické barvení.

Metody barvení oxidické vrstvy můžeme dále pomyslně rozdělit na dvě základní kategorie: metody barvení po anodické oxidaci (adsorpční a elektrolytické barvení) a metody barvení při anodické oxidaci (integrální barvení). Po barvení je nutné provést oplach nejlépe v demineralizované vodě.



Obr. 2-3 Schematické znázornění metod barvení [3]

## Adsorpční barvení

Při adsorpčním barvení se využívá pórovitosti oxidické vrstvy – do pórů se ukládají pigmenty barviv. K barvení dochází bez přítomnosti elektrického proudu buď v roztoku anorganických, nebo organických látek (pigmentů) [3].

## Elektrolytické barvení

Při elektrolytickém barvení je součást umístěna v lázni kovových solí a napojena na zdroj střídavého proudu. Díky průchodu střídavého proudu lázni dochází k rozkladu těchto solí za vzniku iontů, které se ukládají do pórů oxidické vrstvy. Vzniklý barevný odstín je odolný vůči vysokým teplotám a je stabilní na světle [3].

## Integrální barvení

Integrální barvení je značně rozdílné od dvou předchozích metod v tom, že při něm vzniká barevný odstín již při samotné anodické oxidaci. Probíhá ve speciálních elektrolytech s příměsmi, které přímo zabarvují vznikající vrstvu. Vzniklé zabarvení je na světle stabilní [3].

### 2.2.4 Utěsnění oxidických vrstev

Utěsnění, angl. sealing, je závěrečnou operací celého procesu anodické oxidace a jeho nedílnou součástí. Při utěsnění dochází k uzavření porézní vrstvy, která je za běžných podmínek velmi reaktivní, a tím ochránění oxidické vrstvy vůči korozním, či mechanickým vlivům. Dalším benefitem utěsnění vzniklé oxidické vrstvy je zvýšená odolnost vůči světlu a povětrnostním vlivům. Po utěsnění je nutné provést oplach nejlépe v demineralizované vodě. V současné době známe tyto metody utěsnění [3]:

- sealing za středních teplot (82–88 °C),
- studený sealing (20–30 °C),
- sealing za horka (min. 97 °C),
- sealing za horka s roztoky kovových solí.

## Sealing za středních teplot

Metoda sealingu za středních teplot je v zásadě identická s metodou sealingu za horka pouze s tím rozdílem, že při sealingu za středních teplot jsou v lázni použity chemikálie snižující účinný rozsah sealingových teplot na rozmezí 82–88 °C. To má za následek zásadní snížení provozních nákladů sealingových lázní především co se ceny za ohřev týče. Další nespornou výhodou této metody je žádné zatížení odpadních vod těžkými kovy jako je to u metody studeného sealingu. Zásadní nevýhodou této metody je však značná barevná nestálost oxidických vrstev barvených metodou elektrolytickou, či organicky barvených [3].

## Studený sealing

Metoda studeného sealingu je založena na japonském patentu z roku 1974, zde se však používá velmi zřídka [3]. Tato metoda funguje na principu naplnění pórů oxidické vrstvy solemi hliníku a niklu. Sealingová lázeň pro tuto metodu se skládá z demineralizované vody a iontů niklu a fluoridu. Koncentrace niklu v lázni musí být větší než 1,55x koncentrace volného fluoridu. Sealingová lázeň by měla být v rozmezí teplot 25–30 °C a její pH by se mělo pohybovat mezi 6 až 6,5. Doba namáčení součástí je v intervalu 0,8–1,2 minuty/ $\mu\text{m}$  oxidické vrstvy. Nespornou výhodou studeného sealingu oproti sealingu za horka je minimální spotřeba energie. Zásadní nevýhodou této metody je zatížení odpadní vody ionty niklu [3].

## Sealing za horka

Sealing za horka probíhá účinně v rozmezí teplot 97 °C až do bodu varu sealingové směsi. Jako sealingová lázeň se používá demineralizovaná voda a přísady zamezující tvorbě povlaku, který vytváří na povrchu součástí nežádoucí bílošedé mapy. Jako přísady se používají především: sloučeniny polyhydroxylů, fosforečnanů a kyseliny oxouhličitě. Doba namáčení v sealingové lázni je přímo úměrná tloušťce vytvořené oxidické vrstvy anodickou oxidací a to 3 minuty/ $\mu\text{m}$ . Hodnoty pH lázně by se měly pohybovat v intervalu 5,8–6,2 a v případě potřeby se upravují pomocí kyseliny octové [4].

## Sealing za horka s roztoky kovových solí

Princip sealingu za horka s roztoky kovových solí je v podstatě identický se sealingem za horka pouze s tím rozdílem, že lázeň je ještě navíc obohacena o rozpuštěné kovové soli. Tyto soli se vstřebávají do povrchu součástí a přispívají tak ke zlepšení efektu utěsnění. Především oxidické vrstvy barvené organickými barvivy byly v minulosti utěsňovány v roztocích obsahující kovové soli z toho důvodu, že při této metodě utěsnění ztrácely méně barvy, než při klasické metodě utěsnění za horka [3].

## 2.2.5 Vliv legujících prvků hliníkových slitin na anodickou oxidaci

Během procesu anodické oxidace se vzniklá oxidická vrstva na materiál nenanáší, ale vzniká přímo ze samotného materiálu. Tato vrstva může mít různé technické funkce např. ochrana před opotřebením, ochrana proti korozi atd., ale také ve většině případů i funkci estetickou. Anodická oxidace může být v podstatě provedena u téměř libovolné hliníkové slitiny, můžeme však pozorovat, že oxidická vrstva nemá na jednotlivých hliníkových slitinách stejné mechanické a vizuální vlastnosti. Rozdíly jsou dány složením těchto slitin, konkrétně druhy legujících prvků a jejich procentuálnímu obsahu ve slitině [6]. Dle jejich složení lze také vyvodit závěr pro jakou metodu anodické oxidace se daná slitina nejvíce hodí.

Slitinová příměs	Účinky na vytvoření a vlastnosti oxidických vrstev
Hořčík (Mg)	<ul style="list-style-type: none"><li>• MgO má podobný index lomu (1.749) jako oxid hlinitý (1.69)</li><li>• až do obsahu do cca 3 % → čiré bezbarvé oxidické vrstvy</li><li>• při &gt; 3 % Mg → zakalení oxidické vrstvy</li><li>• malý vliv na tvrdost vrstvy</li></ul>
Mangan (Mn)	<ul style="list-style-type: none"><li>• již u podílu od 0.1 do 0.3 % → nažloutlý vzhled</li><li>• až do 1 % → šedivé, hnědé a zčásti prošedivělé oxidické vrstvy</li></ul>
Křemík (Si)	<ul style="list-style-type: none"><li>• 0.7 % šedivé zbarvení, u čistého hliníku s nízkým stupněm čistoty se může objevit zakalení oxidické vrstvy</li><li>• se stoupajícím obsahem křemíku se stává tmavé zbarvení intenzivnější a při obsahu od &gt; 10 % může dojít k tmavě šedivému až černému zbarvení oxidické vrstvy</li></ul>
Měď (Cu)	<ul style="list-style-type: none"><li>• &lt; 0.2 % → čiré protikorozi oxidické vrstvy</li><li>• &gt; 0.2 % → měkké oxidické vrstvy se špatnými protikoroziními vlastnostmi - šedivým/hnědým zbarvením</li><li>• &gt; 2.0 % → pórovité vrstvy, které se nedají dobře utěsnit</li></ul>
Zinek (Zn)	<ul style="list-style-type: none"><li>• &lt; 5 % → žádné podstatné narušení oxidické vrstvy (trochu nižší tvrdost)</li></ul>
Železo (Fe)	<ul style="list-style-type: none"><li>• &gt; 0.5 % → zakalení oxidické vrstvy</li></ul>
Chrom (Cr)	<ul style="list-style-type: none"><li>• &gt; 0.1 % → zažloutnutí oxidické vrstvy</li></ul>

Tab. 2-6 Vliv slitinového kovu na vlastnosti hliníkových oxidických vrstev [3]

## 3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

### 3.1 Analýza problému

Anodická oxidace v technické praxi je velmi složitý, časově a prostorově náročný proces s mnoha operacemi. Zde vzniká otázka, zda je možné skloubit všechny důležité části procesu a vytvořit tak kompaktní zařízení, které bude možné jednoduše obsluhovat. Nejprve musíme ze všech možných variant technologického postupu anodické oxidace vybrat právě ten, který bude nejjednodušší na provedení a nebude vyžadovat vyhřívanou vanu s tepelnou regulací. To by totiž přidalo spoustu dalších konstrukčních a technologických výzev včetně dalších bezpečnostních rizik.

### 3.2 Cíl práce

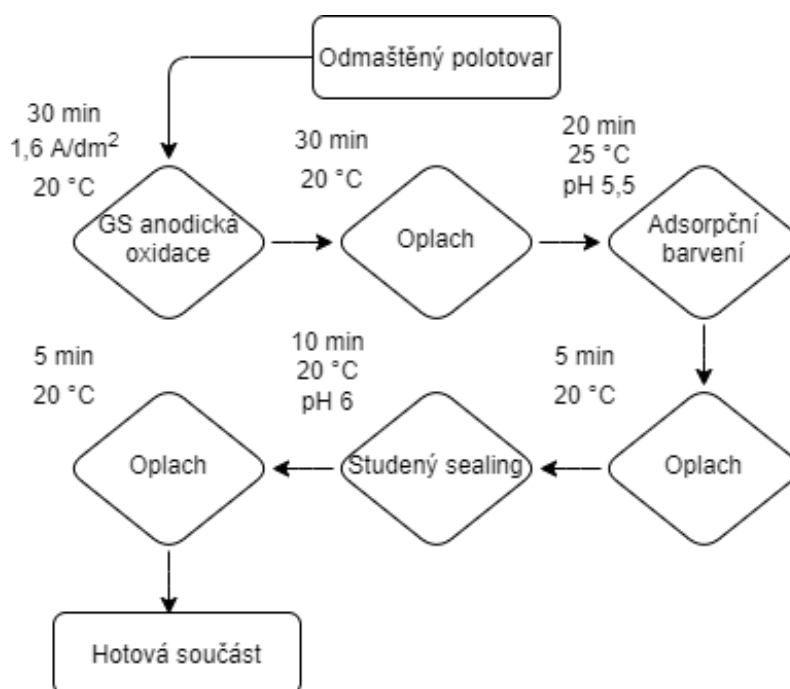
Hlavním cílem práce je konstrukční návrh mobilní eloxovací stanice pro laboratorní účely, která bude umožňovat řízenou pasivaci hliníkových dílců s těmito parametry:

- Vhodné pro součásti o rozměrech do 200 x 100 x 100 mm,
- Jednoduchá obsluha – jeden člověk bez speciálních nástrojů dokáže plně obsluhovat eloxovací zařízení,
- Rozměrová a hmotnostní nenáročnost – zařízení se vejde na standartní stůl o rozměrech 2 x 1 m a nosnosti 50 kg,
- Cena do 10 000 Kč.

## 4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

### 4.1 Technologický postup anodické oxidace v kompaktním zařízení

Jak je již zřejmé, tak technologický postup anodické oxidace v kompaktním zařízení musí být podstatně zjednodušený od technologického postupu, který se používá standartně v provozu. Jako největší zjednodušení vidím v absenci odmašťovací a mořicí lázně, které by musely být vyhřívané. Zde se předpokládá, že polotovary již přijde řádně odmaštěný a zbavený povrchových vad. Schéma zjednodušeného technologického postupu je na Obr. 4-1.



Obr. 4-1 Diagram zjednodušeného technologického postupu anodické oxidace

Prvním krokem celého procesu je anodická oxidace GS metodou. Její výhodou je použití lehce dostupných chemikálií – kyselina sírová a také to, že jde provádět při běžných pokojových teplotách a lázně tudíž není potřeba ohřívat ani chladit. Parametry lázně, které se musí dodržet: koncentrace kyseliny sírové 180–200 g/l demineralizované vody, provozní teplota 18–20 °C, napětí na elektrodách 13–20 V a proudová hustota 1,6 A/dm² [3].

Druhým, čtvrtým a šestým krokem je oplach součástí v demineralizované vodě při běžné pokojové teplotě. Po anodické oxidaci je třeba součást oplachovat alespoň po dobu, co byla v eloxovací lázni – tedy 30 min.



Třetím krokem je adsorpční barvení organickými barvivy. Lázeň pro adsorpční barvení je jedinou lázní, která se bude muset ohřát v případě, bude-li požadavek na jinou než šedou barvu. Příslušné parametry lázně se odvíjí od typu a barvy použitého organického barviva. Parametry lázně pro šedé zabarvení: teplota 25 °C, pH okolo 5,5, koncentrace barviva 1–2 g/l.

Pátým krokem je uzavření oxidické vrstvy neboli sealing. Pro tento proces jsem zvolil typ sealingu za studena pomocí lázně s přípravkem Rogal 21. Parametry lázně: koncentrace 2–3 litry Rogalu 21 na 100 litrů demineralizované vody, teplota 20–30 °C, pH 5,5–6 [8].

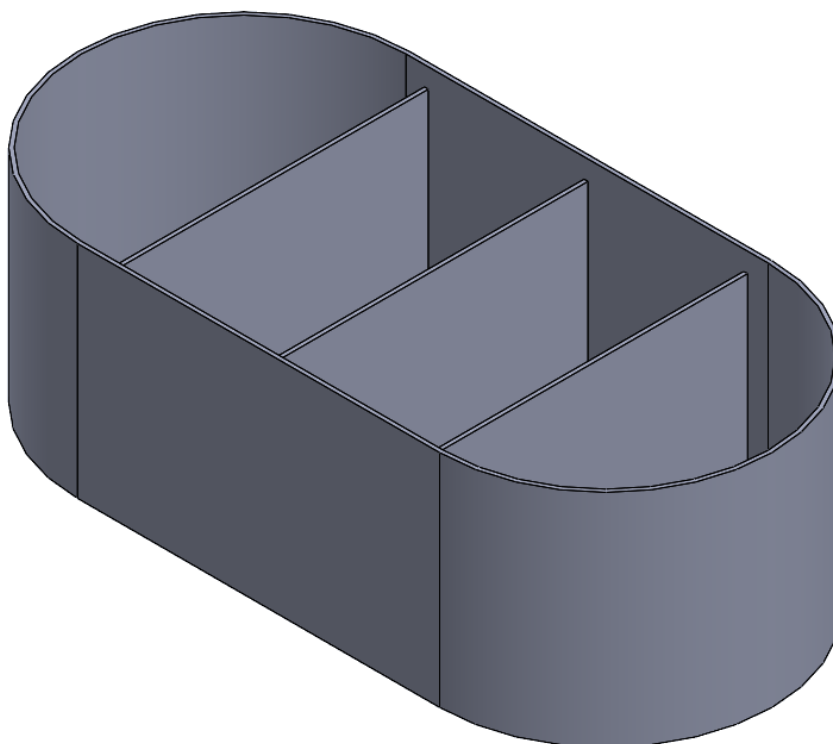
## 4.2 Návrh vany

Jelikož technologický proces anodické oxidace obsahuje několik dílčích kroků a s tím souvisejících druhů lázní, je také třeba navrhnout eloxovací vanu tak, aby bylo možné jednotlivé lázně od sebe držet odděleně. Jako nejvhodnější způsob provedení se jeví vytvořit jednu velkou vanu a tu přepážkami rozdělit na několik menších van. Tímto by se předešlo nutnosti mít pro každou eloxovací lázeň samostatné zařízení anebo v případě jediné vany neustálému obměňování lázní.

Vanu je důležité navrhnout s ohledem na maximální velikost eloxované součásti jejíž rozměry činí 200 x 100 x 100 mm a také s ohledem na to, aby byla jednoduše skladná a dala se v prázdném stavu přenášet.

### 4.2.1 Varianta A

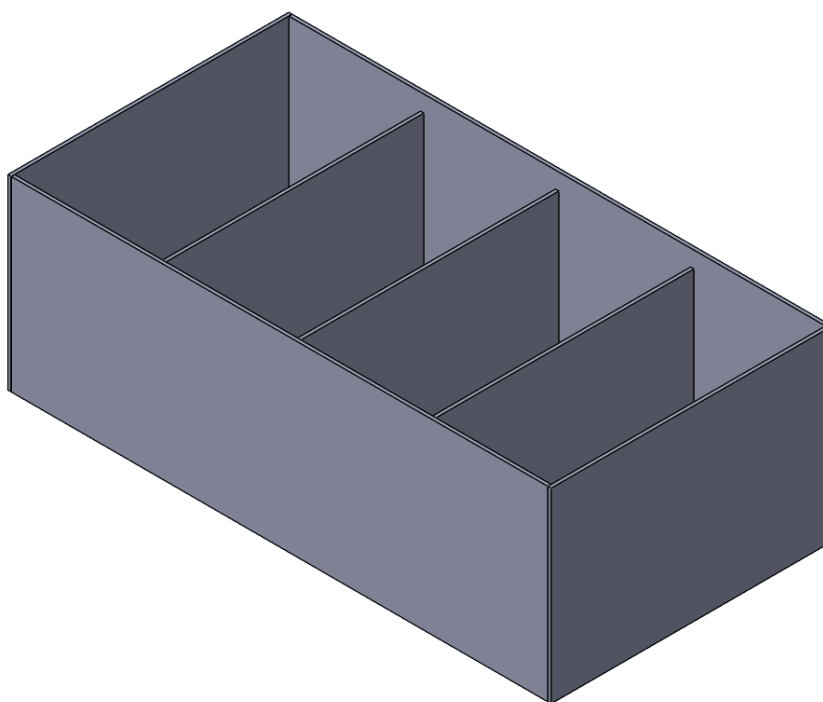
Jako první variantu jsem vymodeloval oválnou vanu rozdělenou přepážkami, která svůj největší rozměr má na šířku. Tato varianta má výhodu především v estetičnosti řešení, ale její nevýhodou v tomto konkrétním případě je odlišný objem krajních van oproti těm hranatým a tím méně prostoru pro součástky. Také by bylo problematictější napasovat na ní boční madla kvůli přivaření, jelikož by se musel do trubek vybrousit rádius pod daným úhlem a také napasování vypouštěcích ventilů na zakulacené plochy.



Obr. 4-2 Varianta A eloxovací vany

#### 4.2.2 Varianta B

Jako druhou variantu jsem vymodeloval hranatou vanu rozdělenou přepážkami, která svůj největší rozměr má na šířku. Tato varianta má výhodu ve větší skladnosti, stejném objemu všech van a také v jednodušší výrobě. Její nevýhodou je však fakt, že boční plášť se nyní skládá ze čtyř výpalků, které bude možná o něco více problematické napasovat na sebe kvůli výrobním tolerancím, než je tomu u varianty A, kde se boční plášť skládal pouze z jednoho výpalku, který je ohnutý kolem podstavy a vertikálně svařený. Další nevýhodou můžou být větší deformace způsobené zanesením tepla při svařování, jelikož tato varianta obsahuje více svarů.



Obr. 4-3 Varianta B eloxovací vany

### 4.2.3 Varianta C

Jako úplně rozdílnou a pravděpodobně nejjednodušší variantu na provedení se nabízí poskládat eloxovací zařízení z několika skleněných van, které se dají zakoupit ve specializovaných obchodech s chemickým sklem např. od firmy Verkon. Jednoznačné výhody jsou: 100% chemická odolnost vůči eloxovacím lázním a rozměrová variabilita, kdy je možno sestavu poskládat libovolně podle aktuálních rozměrových požadavků. Oproti tomu nevýhody jsou: velká křehkost skleněných nádob, pravděpodobně vyšší hmotnost a cena oproti variantě z korozivzdorné oceli, omezený výběr z rozměrových variant a v neposlední řadě také nekompaktnost tohoto zařízení, kde by se jednotlivé nádoby musely přenášet samostatně.



Obr. 4-4 Varianta C—Skleněná nádoba od firmy Verkon [9]

### 4.3 Volba materiálu vany

Jako výhodná volba materiálu se jeví některá ocel spadající do oblasti korozivzdorných ocelí. Výhod je hned několik: tyto oceli jsou velmi často odolné proti roztokům kyselin, nevyžadují lakování či jinou povrchovou úpravu a také disponují TIG svářečkou a zkušenostmi se svařováním nerezových ocelí.

Jako nejvhodnější materiál z kategorie korozivzdorných ocelí se jeví ČSN 17 348 (dle evropské normy X6CrNiMoTi17-12-2, avšak při nákupu nejčastěji značená dle DIN normy jako 1.4571) [10]. Mezi její přední výhody patří: odolnost proti plošné a bodové korozi v prostředí kyseliny sírové a fosforečné a také dobrá svařitelnost [11]. Ani po svaření rozměrnějších dílů z této oceli není nutné svarek tepelně zpracovávat [12].

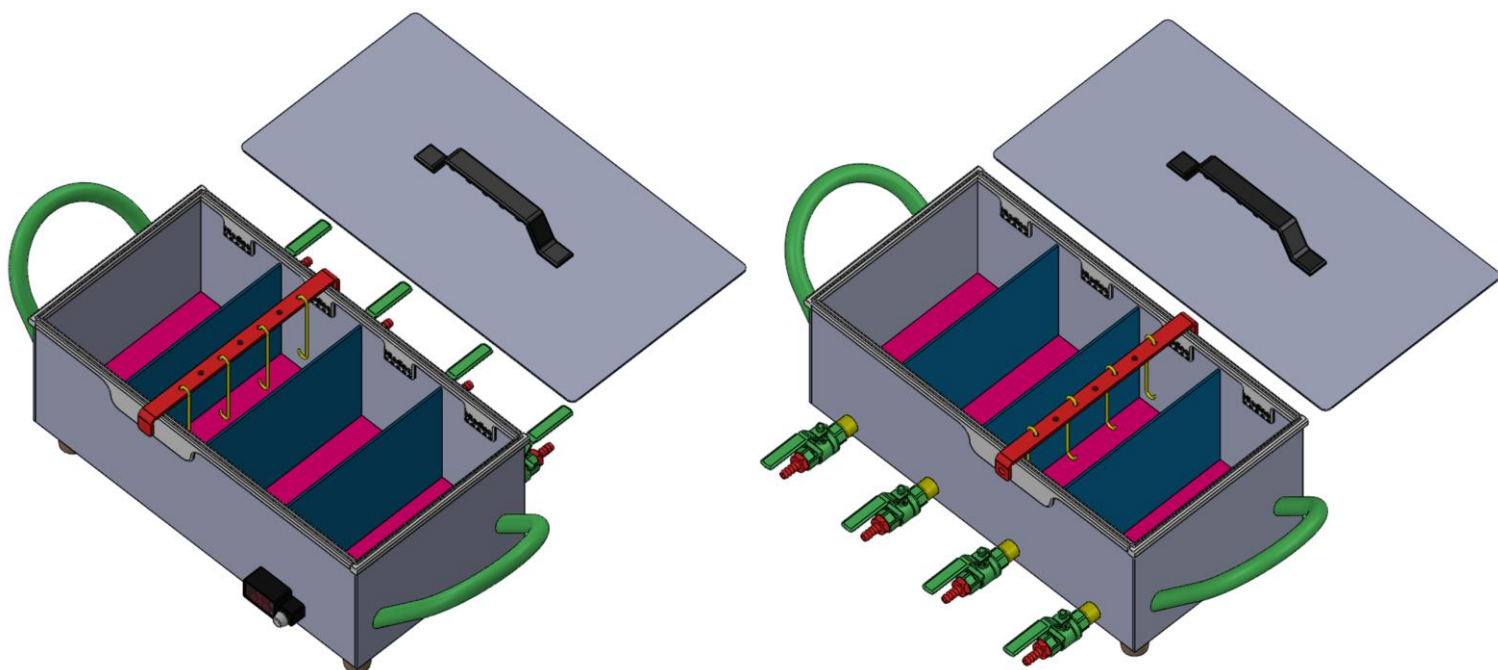
<b>Mechanické vlastnosti materiálu ČSN 17 348</b>			
Označení (ČSN)	Mez pevnosti v tahu (MPa)	Mez kluzu $R_p$ 0,2% (MPa)	Struktura
17 348	500–700	200	Austenitická

Tab. 4-1 Mechanické vlastnosti materiálu ČSN 17 348 [10]

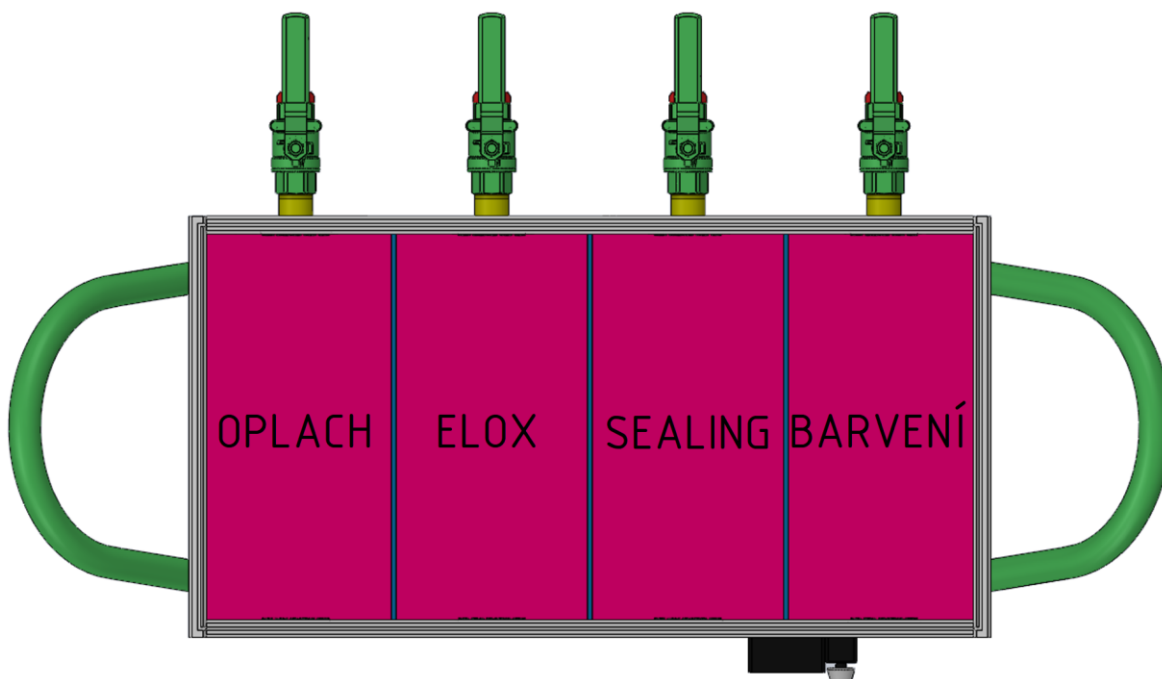
## 5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Zvolené koncepční řešení B (Obr. 4-3) je v této části práce rozpracováno do celkového konstrukčního řešení. To předpokládá kompletní tvarové řešení všech vyráběných komponent, jejich zařazení do sestavy s koupenými díly, výpočet zdroje a v neposlední řadě také kalkulace nákladů realizace eloxovacího zařízení. Hmotnost celé sestavy bez provozních kapalin je přibližně 18 kg, s provozními kapalinami přibližně 34 kg a funkční objemy jednotlivých van jsou 3,9 l.

### 5.1 Varianta B



Obr. 5-1 Varianta B, výsledné řešení



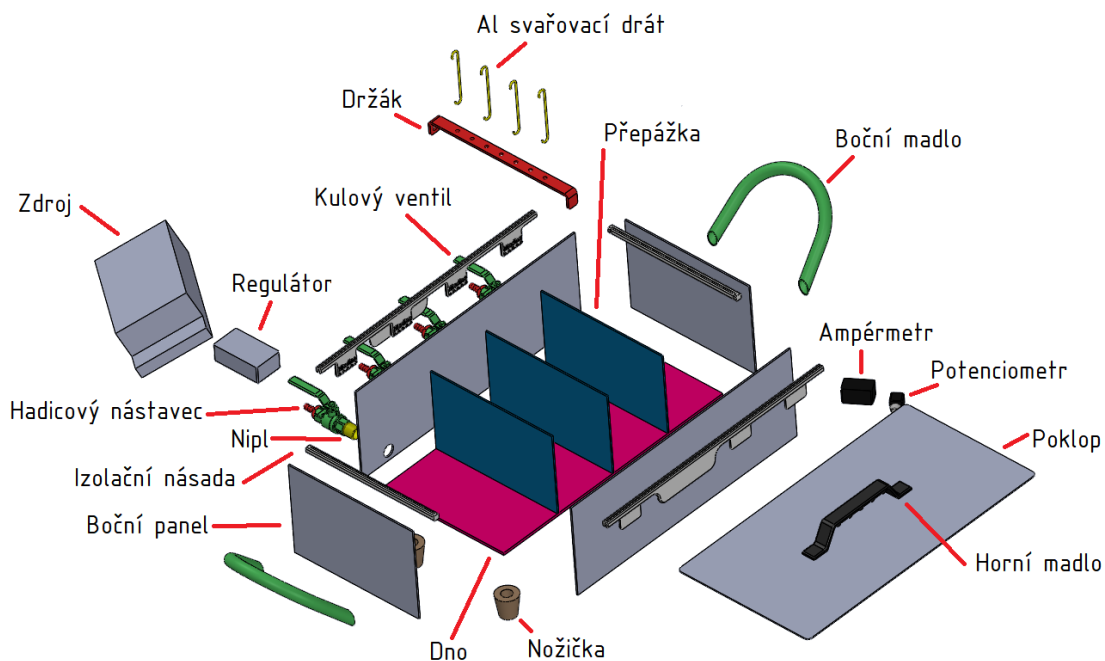
Obr. 5-2 Schéma pořadí lázní

### 5.1.1 Popis konstrukce

Boční panely, dno a přepážky jsou vypáleny na laseru z nerezové oceli a následně svařeny na pozicích dle výkresu sestavy. Tyto komponenty v sestavě tvoří záporný elektrický pól. Držák, který tvoří kladný elektrický pól, pro zavěšení hliníkových drátů a následnou fixaci eloxovaných součástí je vypálen také na laseru z nerezové oceli a jeho kraje jsou ohnuty ve svěráku na požadovaný úhel. Boční madla jsou vyrobena z nerezové trubky, zkrácena na požadovaných rozměr a následně ohnuta na trubkové ohýbačce. Jejich fixaci k plášti zajišťuje opět svar stejně jako u nátrubků pro našroubování vypouštěcích ventilů. Izolační násady, nožičky, krabička pro elektronické komponenty a horní madlo budou vytištěny na 3D tiskárně z materiálu PET-G, který je odolný vůči působení kyseliny sírové do 20% koncentrace a přilepeny pomocí dvousložkového epoxidu [13]. Izolační násady jsou z horní strany opatřeny drážkou, která je vyplněna silikonem a ten těsní s poklopem. Tím je vyřešen problém vypařování lázní, když se zrovna eloxovací zařízení nepoužívá.

### 5.1.2 Jednotlivé díly

Výsledná sestava obsahuje okolo 30 komponent, přičemž pro provoz je třeba ještě zařízení naplnit provozními kapalinami – lázněmi. Podrobné pohledy, počty kusů a pozice dle výkresové dokumentace v příloze 1.



Obr. 5-3 Popis sestavy eloxovacího zařízení

## 5.2 Výpočet zdroje

Jako největší oříšek celé eloxovací sestavy se jeví zdroj. Při použití kombinace GS anodické oxidace a elektrolytického barvení by totiž byl potřeba zdroj, který umí dodávat jak stejnosměrný, tak střídavý proud o relativně vysokých proudových hodnotách. Zdroj splňující tyto požadavky je však zbytečně drahý a neúměrně by zvedal cenu celého projektu. Rozhodl jsem se tedy pro kombinaci GS anodické oxidace a adsorpčního barvení.

Požadavek na napětí u GS anodické oxidace je 13–20 V a u proudu 1,4–2 A/dm<sup>2</sup>. Jako referenční součást pro výpočet proudu, který bude muset zdroj umět dodávat jsem použil jednoduchý L profil o rozměrech 200 x 100 x 100 mm a tloušťce stěny 4 mm viz. Obr. 5-4. Plošný obsah součásti vyšel 62 368 mm<sup>2</sup>, což je přibližně 6,3 dm<sup>2</sup>. Proudovou hustotu je možné vyjádřit jako [14]:

$$J = \frac{I}{S}$$

Kde  $I$  – elektrický proud (A);

$S$  – plošný obsah (m<sup>2</sup>).

Z toho vyplývá, že proud potřebný k úspěšné anodické oxidaci lze vypočíst ze vztahu:

$$I = J \cdot S$$



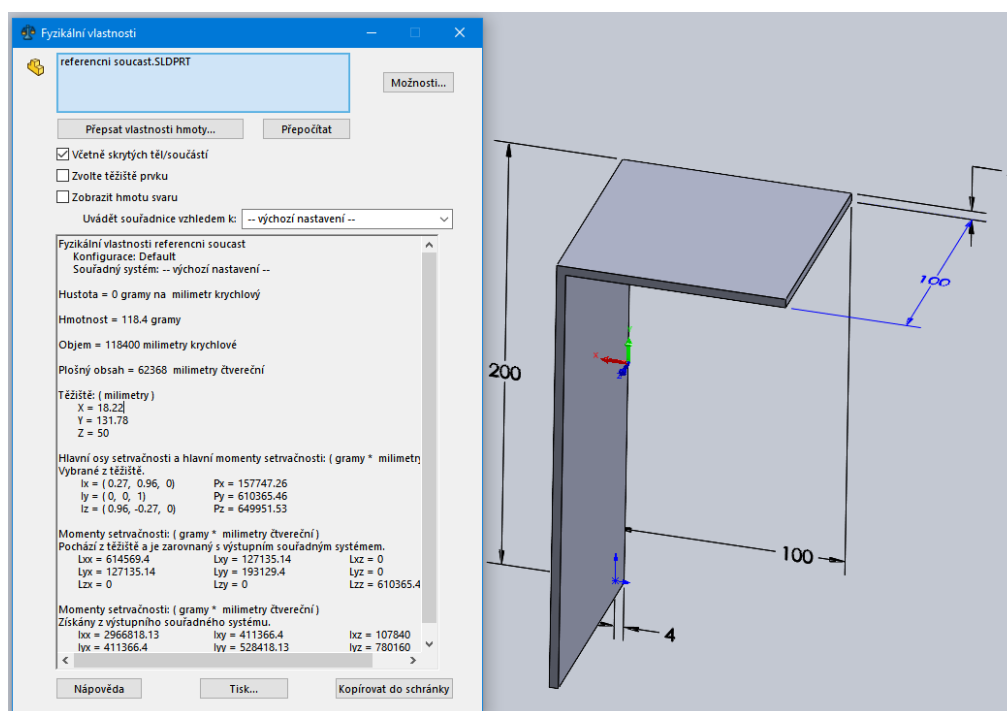
Abych však zajištil určitou bezpečnost a proudovou rezervu při potřebě eloxovat součásti o vyšším plošném obsahu, popř. více součástí naráz, zvolil jsem návrhový součinitel  $K = 3$ . Výsledný vzorec pro výpočet proudu, který musí umět zdroj stabilně dodávat je tedy:

$$I = J \cdot S \cdot K$$

Po dosazení:

$$I = 1,6 \cdot 6,3 \cdot 3 = 30,24 \text{ A}$$

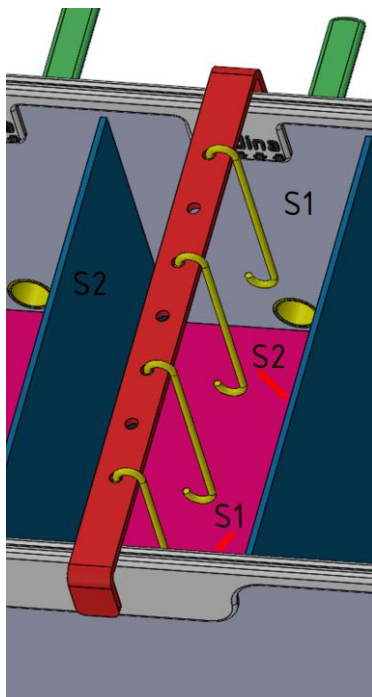
Z rozvahy tedy vyplývá, že bude potřeba použít stejnosměrný zdroj s pevným napětím v rozmezí 13–20 V a laditelným proudem minimálně 0–30 A, anebo stejnosměrný zdroj s laditelným napětím tak i proudem v daných mezích. Rozhodl jsem se tedy pro průmyslový zdroj S-480-12 12V/40A, který je možné stále zatěžovat proudem 32 A a tudíž je vhodný pro tuto aplikaci [15]. Regulaci proudu bude obstarávat proudový regulátor s nastavitelným potenciometrem a hodnotu proudu bude zobrazovat digitální ampérmetr.



Obr. 5-4 Referenční součást

### 5.3 Výpočet plochy elektrod

Plocha katody – vany by měla být 1,5x až 2,5x větší než plocha anody – eloxované součásti. [3]. Na Obr. 5-5 můžeme vidět popis ploch katody.



Obr. 5-5 Detail eloxovací vany

Jelikož všechny provozní kapaliny eloxovacího zařízení budou sahat do výšky 130 mm ode dna, plochu katod můžeme vyjádřit při neuvažování plochy ponořeného hliníkového drátu a vnitřního obsahu niplu jako:

$$S_K = 2 \cdot (S_1 + S_2)$$

Po dosazení:

$$S_K = 2 \cdot 130 \cdot (120 + 250) = 96\,200 \text{ mm}^2$$

Plošný obsah referenční součásti je 62 368 mm<sup>2</sup> viz. kapitola 5-2. Podělením těchto dvou čísel dostáváme hodnotu 1,54, takže návrh ploch elektrod je v předepsaném intervalu. Maximální plocha součástí, které lze současně eloxovat při dodržení předepsaného kritéria je 64 133 mm<sup>2</sup>.

## 5.4 Realizace



Obr. 5-6 Svarek eloxovacího zařízení

Na Obr. 5-6 můžeme vidět aktuální postup stavby eloxovacího zařízení. Zatím se jedná pouze o surový svarek, který je nutno dále obrousit a odmořit. Poté přijde na řadu skládání tištěných dílů a jejich lepení na zařízení. Jako finální operace bude zapojení a zprovoznění elektroniky.

### 5.4.1 Cenová kalkulace

Ceny uvedené v Tab. 5-2 jsou pouze informativního charakteru a v současné době již nemusejí být platné. Kupované díly jsou z několika různých e-shopů a vyráběné plechové díly jsou vypáleny na laseru firmou KOVO – PLAZMA s.r.o. kde by se dalo dosáhnout nižší ceny při výrobě série několika kusů. Nutno podotknout, že náklady uvedené v Tab. 5-1 jsou bez nákladů za přepravu a také zde nejsou zahrnuty náklady na svařovací plyn – v tomto případě argon.

Název položky	Počet ks	Cena za ks s DPH	Cena celkem s DPH
Kulový kohout 1/2"	4	187,55 Kč	750,20 Kč
Nipl 1/2"	4	30,25 Kč	121,00 Kč
Hadicový nástavec	4	49,61 Kč	198,44 Kč
Mořící gel	1	284,35 Kč	284,35 Kč
Teflonová páska	3	7,99 Kč	23,97 Kč
PVC hadice	1	198,00 Kč	198,00 Kč
Startovací kabel	3	143,00 Kč	429,00 Kč
Jednojádrový kabel	3	21,00 Kč	63,00 Kč
Kabelový konektor Hella Ø8.4 mm	4	46,00 Kč	184,00 Kč
Kabelový konektor Hella Ø4.3 mm	4	7,00 Kč	28,00 Kč
Kolébkový spínač	1	141,00 Kč	141,00 Kč
Spínací relé 12V/40A	1	69,00 Kč	69,00 Kč
Patice s kontakty pro relé	1	83,00 Kč	83,00 Kč
Napájecí zdroj	1	1 089,00 Kč	1 089,00 Kč
Síťový kabel	1	54,45 Kč	54,45 Kč
Proudový regulátor	1	395,00 Kč	395,00 Kč
Ampérmetr 50A	1	210,00 Kč	210,00 Kč
Al drát Ø3.2 mm	5	8,00 Kč	40,00 Kč
Al drát Ø2.4 mm	5	5,00 Kč	25,00 Kč
Nerez drát Ø2.4 mm	8	14,00 Kč	112,00 Kč
Nerez drát Ø1.6 mm	4	7,00 Kč	28,00 Kč
Elektroda Ø2.4 mm	1	117,00 Kč	117,00 Kč
PET-G filament	1	480,00 Kč	480,00 Kč
Kyselina octová ledová 1000 ml	1	211,75 Kč	211,75 Kč
Octan sodný trihydrát 1000 g	1	280,72 Kč	280,72 Kč
Kyselina sírová 96% čistá 5l	1	375,10 Kč	375,10 Kč
Alumal black 100 g	1	0,00 Kč	0,00 Kč
Rogal 21 1000 ml	1	242,00 Kč	242,00 Kč
Destilovaná voda 25l	2	225,00 Kč	450,00 Kč
Nerezová trubka Ø20x2 mm 1000 mm	2	199,00 Kč	398,00 Kč
Výpalky na laseru	1	5 142,00 Kč	5 142,00 Kč
<b>Celkem s DPH (21%)</b>			<b>12 222,98 Kč</b>
<b>Celkem bez DPH</b>			<b>10 101,64 Kč</b>

Tab. 5-1 Cenová kalkulace

## 6 DISKUZE

Cílem bakalářské práce bylo vytvoření kompaktního zařízení, které by umožnilo řízenou pasivaci hliníkových dílců. V práci byly popsány celkem tři konstrukční návrhy, ze kterého byl zvolen jeden finální a ten je v práci rozpracován do detailů.

Jednotlivé díly eloxovacího zařízení byly navrženy s ohledem na jednoduchost výroby. Co se týče elektronických komponent tak zase použití co nejvíce koupených funkčních celků. Zařízení je sice funkční, ale zdaleka není dokonalé. Absence vyhřívání barvicí lázně činí barvení eloxovaných předmětů problematické a v podstatě selektuje možné barevné varianty provedení na jednu jedinou – šedou barvu. Při přidání vyhřívání do této lázně se však může narazit na další problém, a to znehodnocení funkčních parametrů sealingové, ale především eloxovací lázně, a to konkrétně její provozní teploty. Teplota eloxovací lázně totiž ovlivňuje tloušťku vrstvy, které lze eloxováním dosáhnout a to tak, že čím vyšší teplota, tím tenčí vrstva. Do budoucna by tedy bylo vhodné k eloxovacímu zařízení ještě dodělat další samostatnou vyhřívanou nádobu pro barvicí lázeň.

Dalším nedostatek vidím v absenci odmašťovací, ale především mořicí lázně. Moření by zlepšilo estetiku součástí a eliminovalo některé povrchové vady. Tato lázeň by však musela být opět vyhřívána a nejlépe tedy opět oddělená od eloxovacího zařízení, aby nedocházelo k ohřevu anodické lázně.

Budoucím vylepšením eloxovacího zařízení by mohlo být přidání mikrokontroléru např. Arduina, které by řídilo eloxovací proces. Mohlo by to vypadat tak, že pomocí malé číselné klávesnice a displaye by se zadal povrch součásti v dané jednotce a požadovaná tloušťka eloxované vrstvy. Řídící elektronika by sama vypočítala a nastavila potřebný proud a dobu procesu, po kterém by vypnula přívod elektrického proudu do eloxovací větve a zvukově upozornila obsluhu, že proces je u konce. Stejně tak by mohla řídit krokový motor, který by pohyboval držákem součástí v lázni a tím zajišťoval proudění elektrolytu kolem eloxovaných součástí, což by mohlo vést ke zvýšení kvality výsledné vrstvy.

Celková hmotnost zařízení s provozními kapalinami je cca 34 kg a její celkové rozměry činí 729 x 438 x 225 mm bez odpadních hadic.

## 7 ZÁVĚR

Hlavním cílem bakalářské práce bylo vytvoření kompaktního zařízení, které by umožnilo řízenou pasivaci hliníkových dílců. Byla provedena řešerše technologií pasivace slitin hliníku, byl popsán technologický postup průmyslového postupu anodické oxidace. Technologický postup byl dále zjednodušen pro použití 4 druhů lázní, což umožnilo vytvoření tří koncepčních návrhů zařízení, z nichž byla vybrána nejvhodnější varianta. Ta byla dále rozpracována do výsledné podoby konstrukčního řešení, které bylo vymodelováno v softwaru Solidworks a byl vyhotoven výkres sestavy, který je v příloze práce. Zařízení bylo svařeno, nyní se sestavuje a v blízké době proběhne jeho testování. Hlavní i dílčí cíle práce byly splněny kromě mnou stanoveného finančního rozpočtu, který jsem ve výsledku překročil o cca 20 % z důvodu použití kvalitnějších materiálů a komponentů, než bylo původně zamýšleno.

Zařízení bude dále opatřeno topnou patronou a PID kontrolerem, který umožní vyhřívání barvicí lázně a díky tomu bude možné součásti barvit i na jiné barvy než šedou. Eloxovací zařízení bude umístěno v laboratořích ÚK a bude tak volně přístupné studentům VUT, kteří na něm budou moci eloxovat své projekty pod dozorem.

## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KREIBICH, Viktor. *Příčiny a důsledky nevhodných aplikací povrchových úprav* [online]. [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://portal.cvut.cz/wp-content/uploads/2017/04/HP2004-15.pdf>. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní.
- [2] ANODIZAČNÍ OXIDACE HLINÍKU. *Angelov.cz* [online]. [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <http://www.angelov.cz/eloxovani-povrchova-uprava-al/>
- [3] MICHNA, Štefan. *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005. ISBN 80-89041-88-4.
- [4] ŠULC, František. *Vady a jejich příčiny při barvení eloxovaných povrchů*. Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [5] Eloxování hliníku. *Astronom.cz* [online]. [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <http://www.astronom.cz/procyon/chemistry/elox.html>
- [6] *Povrcháři* [online]. 2021, [cit. 2021-05-05]. Dostupné z: [http://povrchari.cz/kestazeni/202101\\_povrchari.pdf](http://povrchari.cz/kestazeni/202101_povrchari.pdf)
- [7] PAPÍK, Martin. *Tvrdé eloxování* [online]. Praha, 2015 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/63616/F2-DP-2015-Papik-Martin-Martin\\_Papik\\_Tvrde\\_eloxovani.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/63616/F2-DP-2015-Papik-Martin-Martin_Papik_Tvrde_eloxovani.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [8] Rogal 21 - technický list. *Ekochem-ppu.cz* [online]. [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: [http://www.ekochem-ppu.cz/Technicke\\_listy/roga21.pdf](http://www.ekochem-ppu.cz/Technicke_listy/roga21.pdf)
- [9] SKLENĚNÉ VANY. *Verkon.cz* [online]. [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <https://www.verkon.cz/sklenene-vany/>
- [10] 1.4571 nerezová ocel. *Kipp.cz* [online]. [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <https://www.kipp.cz/cz/cs/Slu%C5%BEby/P%C5%99ehled-materi%C3%A1l%C5%AF/nerezov%C3%A1-ocel/1-4571-nerezov%C3%A1-ocel.html>
- [11] Jakosti nerezových materiálů. *Inerez.cz* [online]. [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <https://www.inerez.cz/jakosti-nerezovych-materialu/#>

- [12] Materiálove normy. *Novel.sk* [online]. [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <http://www.novel.sk/materialove-normy/>
- [13] Nalgene Chemical Compatibility - Bottles & Containers. *Calpaclab.com* [online]. [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <https://www.calpaclab.com/chemical-compatibility-bottles-containers/>
- [14] Hustota elektrického proudu. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Hustota\\_elektrick%C3%A9ho\\_proudu](https://cs.wikipedia.org/wiki/Hustota_elektrick%C3%A9ho_proudu)
- [15] Napájecí zdroj pro LED S-480-12 12V 40A 480W. *Hotair.cz* [online]. [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <https://www.hotair.cz/detail/prumyslove-zdroje/modulove-pro-vestavbu/napajeci-zdroj-pro-led-s-480-12-12v-40a-480w.html>
- [16] 8 Things You Need to Know About Anodizing Aluminum [online]. [cit. 2021-05-07]. Dostupné z: <https://www.starrapid.com/blog/7-things-you-need-to-know-about-anodizing-aluminum/>
- [17] *Citace.com* [online]. [cit. 2021-05-05]. Dostupné z: [www.citace.com](http://www.citace.com)
- [18] ELOXOVÁNÍ. *Eloxtech.cz* [online]. [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <http://www.eloxtech.cz/index.html#news>
- [19] Eloxování. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2021-05-05].
- [20] *Hadicový nástavec* [online]. [cit. 2021-05-07]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/hose-connector-2>
- [21] Historie hliníku. *Alinvest.cz* [online]. [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <https://www.alinvest.cz/cs/hlinik/historie-hliniku>
- [22] Chemická odolnost nerezových materiálů. *Ilus.sk* [online]. [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <http://ilus.sk/odolnost.pdf>
- [23] *Klobouk potenciometru* [online]. [cit. 2021-05-07]. Dostupné z: [https://grabcad.com/library/rotary-encoder-or-potentiometer-knob-1/details?folder\\_id=9662310](https://grabcad.com/library/rotary-encoder-or-potentiometer-knob-1/details?folder_id=9662310)



- [24] *Kolébkový spínač* [online]. [cit. 2021-05-07]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/rocker-switch-250v-12a-1>
- [25] SHIGLEY, Joseph E., Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. V Brně: VUTUM, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [26] *Kulový ventil* [online]. [cit. 2021-05-07]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/ball-valve-125>
- [27] PETR, Jiří. *Povrchové úpravy hliníkových slitin*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta chemická, 2013, 66 l. : il. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Martin Zmrzlý, Ph.D. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/21377/final-thesis.pdf?sequence=8&isAllowed=y>.
- [28] Výstražné symboly CLP. *Echa.europa.eu* [online]. [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <https://echa.europa.eu/cs/regulations/clp/clp-pictograms>

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

### 9.1 Použité zkratky

DIN	Německá státní norma
ČSN	Česká státní norma
VUT	Vysoké učení technické v Brně
ÚK	Ústav konstruování

### 9.2 Příklady použitých fyzikálních veličin

$J$	proudová hustota
$I$	elektrický proud
$S$	plošný obsah součásti
$S_I, S_2$	obsah jednotlivých ploch katody
$S_K$	celkový obsah katody
$K$	návrhový součinitel

## 10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1-1	Základní barevné varianty eloxu firmy Angelov [2] .....	13
Obr. 2-1	Schéma zařízení pro anodickou oxidaci [5] .....	14
Obr. 2-2	Diagram technologického postupu anodické oxidace.....	15
Obr. 2-3	Schematické znázornění metod barvení [3] .....	19
Obr. 4-1	Diagram zjednodušeného technologického postupu anodické oxidace.....	24
Obr. 4-2	Varianta A eloxovací vany .....	26
Obr. 4-3	Varianta B eloxovací vany .....	27
Obr. 4-4	Varianta C–Skleněná nádoba od firmy Verkon [9] .....	28
Obr. 5-1	Varianta B, výsledné řešení .....	30
Obr. 5-2	Schéma pořadí lázní .....	31
Obr. 5-3	Popis sestavy eloxovacího zařízení.....	32
Obr. 5-4	Referenční součást .....	33
Obr. 5-5	Detail eloxovací vany .....	34
Obr. 5-6	Svarek eloxovacího zařízení .....	35

## 11 SEZNAM TABULEK

Tab. 2-1	Metody předúprav dle normy DIN 17611 [3].....	16
Tab. 2-2	Varianty postupu anodické oxidace [3] .....	17
Tab. 2-3	Pracovní parametry anodické oxidace – metoda GS a GSX [3] .....	18
Tab. 2-4	Pracovní parametry anodické oxidace – metoda „Bengoug – Stuart“ [3]....	18
Tab. 2-5	Pracovní parametry anodické oxidace – metoda smaltu [3] .....	18
Tab. 2-6	Vliv slitinového kovu na vlastnosti hliníkových oxidických vrstev [3] .....	22
Tab. 4-1	Mechanické vlastnosti materiálu ČSN 17 348 [10] .....	29
Tab. 5-1	Cenová kalkulace .....	36

## 12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – výkres sestavy eloxovacího zařízení

Příloha 2 – návod k obsluze eloxovacího zařízení

Příloha 3 – bezpečnostní a technické listy chemikálií lázní eloxovacího zařízení